

# 计及新能源功率概率分布特征的储能配置优化方法

桑丙玉<sup>1</sup>, 杨波<sup>1</sup>, 陶以彬<sup>1</sup>, 刘克天<sup>2</sup>

(1.江苏省储能变流及应用工程技术研究中心(中国电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 210003; 2.南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 为了降低新能源功率波动对电网的冲击,文章提出了一种计及新能源功率概率分布的储能容量优化配置方法。首先,计算和统计不同时间尺度新能源功率波动量,确定新能源功率概率分布特征;其次,基于新能源功率概率分布特征及并网指标,建立计及时间尺度和功率波动量的储能配置优化模型;再次,基于给定的约束条件和时间尺度,计算波动量满足任意设定概率水平的最小储能充放电调节功率,从而确定储能的额定功率、容量和初始状态;最后,以某地区 50 MW 光伏电站实测数据进行算例分析。结果表明,此方法只调节不满足波动指标的新能源功率值,不会影响满足条件的功率值,所需储能功率和容量最小,且调节后功率不会出现偏移。

**关键词:** 新能源; 功率波动; 概率分布; 储能; 优化配置

**中图分类号:** TK51; TM6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)04-0561-08

## 0 引言

“双碳”目标下,我国风电、光伏等新能源迅速增长,其大规模功率波动对电力系统的运行控制带来挑战,也对系统的爬坡和备用容量提出了更高的要求,并且将影响区域系统的稳定性<sup>[1-3]</sup>。因此,风电场和光伏电站并网技术标准中分别对不同时间尺度的有功功率变化量限值作出了规定<sup>[4]</sup>。目前,新能源功率波动平抑方法主要有两类:一是对新能源自身控制系统进行改进<sup>[5]</sup>,该方法会牺牲新能源有功出力,且受机组控制能力和资源的影响;二是利用储能系统(Energy Storage System, ESS)对新能源波动功率进行调节,通过储能的快速充放电能力使得功率平抑更为灵活,不需要改变机组控制,成为解决新能源功率波动的有效手段之一<sup>[6,7]</sup>。

利用储能平抑新能源功率波动的相关研究主要采用滤波和模型预测方法。文献[7]通过一阶低通滤波得到储能的充/放电功率,实现了较好的平滑出力波动效果。文献[8]提出了基于低通滤波与短时功率预测技术相结合的储能控制方法。文献[9]利用模型预测控制提高光伏出力预测精度来获得最佳储能参考功率,降低了出力波动。文献[10]提出了一种基于递归模糊神经网络的储能系统平滑风电功率波动的控制方法。文献[11]基于

两级滤波器的方案优化电池容量,从而达到所需的光伏平滑水平。目前采用滤波算法平抑后的功率均产生偏移,不能达到精准调节。文献[12]提出了一种光伏最大功率跟踪工作点控制和混合储能系统协调平抑光伏并网功率波动策略。文献[13,14]采用了电池和超级电容混合储能系统平抑并网功率波动,对原始功率和并网功率期望值的差值进行概率统计,用电池补 95%的差值功率,超级电容调节 5%的差值功率。文献[15]考虑不同场景的成本和效益,建立了双层经济指标模型求解储能容量。文献[16]考虑储能接入节点和容量不同对风电出力波动的平抑效果不同,以系统电压偏差、日有功网损和 ESS 配置容量为目标建立储能多目标优化配置模型。文献[17]将技术指标在一定置信范围内作为约束,以储能系统投资和运行成本最小为目标进行优化。

综上,目前以波动指标为优化目标的储能配置方法基本采用试差、试频等找到接近条件的滤波截止频率或调节频段范围,波动指标和储能调节功率之间没有直接的对应关系,由于滤波的整体相移和不能精确定位,一般储能配置容量都是偏大的。效益或成本最优法通常都无法完全满足技术指标要求。本文以新能源并网波动指标为优化目标,对不同时间尺度的新能源输出功率波动量进行概率统计,得

收稿日期: 2023-12-04。

基金项目: 江苏省储能变流及应用工程技术研究中心开放基金(NYN51201901277)。

作者简介: 桑丙玉(1983-),女,硕士,正高级工程师,研究方向为储能优化配置与运行控制技术。E-mail: sbyu5920@163.com

到新能源功率波动的概率分布特征,根据概率分布特征及并网波动指标,建立包含时间尺度、波动量限值和目标并网功率的优化配置模型。考虑储能的充放电运行策略和约束条件,求解满足运行需求的储能充放电调节功率、额定功率、容量和初始状态。根据此方法配置的储能和对应功能的运行策略紧密耦合,所需容量较小。

### 1 新能源发电功率波动特性分析

#### 1.1 功率波动指标定义

光伏电站/风电场有功功率变化是指一定时间间隔内,有功功率最大值与最小值之差<sup>[4,5]</sup>。因此,定义分钟级的功率波动量为一定时间尺度  $T$  内新能源发电输出有功功率最大波动量  $\Delta P_T$ 。

$$\Delta P_T = \max P(\tau) - \min P(\tau), \tau \in [t-T, t] \quad (1)$$

式中:  $T$  为时间窗口,可取 1 min, 10 min 等;  $\max P(\tau)$ ,  $\min P(\tau)$  分别为时间尺度  $T$  内的最大、最小功率。

一定时间尺度  $T$  内新能源发电输出有功功率最大波动率  $F_T$  定义如下:

$$F_T = (\Delta P_T / P_n) \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $P_n$  为新能源发电额定功率。

根据式(1),(2),计算所选样本数据周期内每一个连续  $T$  时间尺度的有功功率最大波动量和波动率,得到整个数据周期内的功率波动量和波动率数值序列,对此进行分析和处理。

#### 1.2 功率波动概率分布

新能源的输出功率是与气象等资源相关的随机变量,  $\Delta P_T$  是与功率采样值相关的离散型随机变量。根据离散型随机变量概率分布定义,  $T$  时间尺度功率波动量的概率分布函数  $P_i$  为

$$P_i(\Delta P_T = \Delta P_{T_i}) = p_{T_i} = \frac{\text{Num}(\Delta P_{T_i})}{N} \quad (3)$$

式中:  $\Delta P_{T_i}$  为  $T$  时间尺度功率波动量的第  $i$  个取值,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $p_{T_i}$  为  $T$  时间尺度功率波动量取第  $i$  个值的概率,满足  $p_{T_i} \geq 0$ , 且  $\sum_{i=1}^n p_{T_i} = 1$ ;  $\text{Num}(\Delta P_{T_i})$  为  $T$  时间尺度功率波动量等于  $\Delta P_{T_i}$  的个数。

根据离散型随机变量的累计概率分布定义,  $T$  时间尺度功率波动量的累计概率分布函数  $F(\Delta P_{T_j})$ , 即  $T$  时间尺度  $\Delta P_T \leq \Delta P_{T_j}$  的概率为

$$F(\Delta P_{T_j}) = P_r(\Delta P_T \leq \Delta P_{T_j}) = \sum_{i=1}^j p_{T_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^j \text{Num}(\Delta P_{T_i}) \quad (4)$$

式中:  $\Delta P_{T_j}$  为  $T$  时间尺度功率波动量第  $j$  个取值,  $1 \leq j \leq N$ 。

根据式(3),(4),可以统计计算出一个数据周期内新能源发电输出功率波动量的概率分布和累计概率分布,获得原始新能源功率信号的波动特性。若波动特性满足并网要求,则不需要配置储能进行调节;若不满足,则需要储能对波动量超出的部分进行调节。

#### 1.3 不同时间尺度的波动概率分析

##### (1) 样本数据选择

光伏出力以天为单位具有周期性,一般光伏以 1 d 为平抑周期;而风电日数据随机性较大,平抑周期可通过出力分析将时间长度延长至 1 周或 1 月。为了使储能规划设计满足不同条件下的长期运行要求,通常所选取的样本数据片段为多个,以囊括各种典型情况。对获取的多个样本数据可采用以下两种方法进行处理:一是对每个样本数据片段进行容量的优化计算,得到若干个设计结果,选取最大值或占比较大的值作为配置容量,对于出现次数极小的值,则认为该值对应的风光出力为特殊情况,可忽略。该方法计算量大,但因为对每组数据均进行了计算,反应出来的容量比较直观,可取较精确的值;二是利用聚类分析,对所有样本数据进行聚类筛选,从中筛选出风光资源场景的聚类图,对每一类型场景求其序列的平均值,即生成与该类型场景对应的序列值,对这些序列值进行功率和容量的优化设计。该方法选取具有代表性的数据作为研究对象,减小了计算量,因为采用聚类分析的方法,所以对某些值进行了类似和平均化处理。

##### (2) 风电光伏功率波动概率分布

以西北某地区 50 MW 风电场和 50 MW 光伏电站实测数据为例,风电取 1 a 的功率数据进行分析,如图 1 所示。

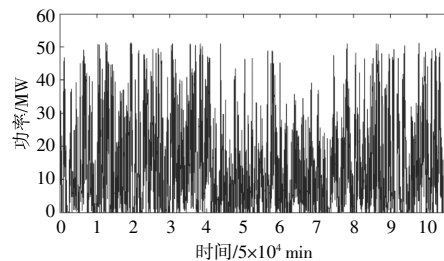


图 1 风电 1 a 的输出功率曲线

Fig.1 Output power of wind power in 1 year

光伏取任意 1 d 中 6:00–18:00 的发电数据, 如图 2 所示。

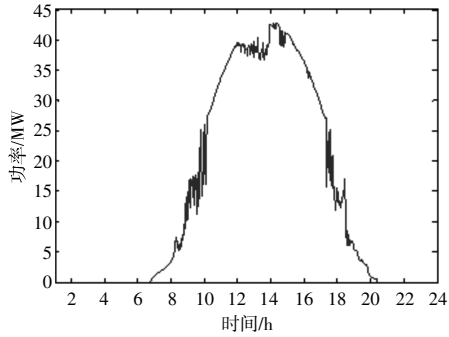
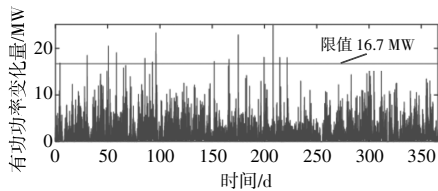


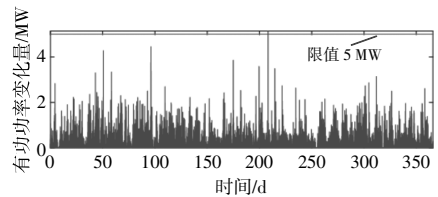
图 2 光伏 1 d 的出力曲线

Fig.2 Output power of PV in 1 day

参考现行标准, 新能源电站 10 min 有功功率变化最大限制不应超过装机容量的 1/3, 1 min 有功功率变化最大限制不应超过装机容量的 10%。根据式(1), (2), 分别计算该风电场 1 min 级和 10 min 级输出最大有功功率变化量, 如图 3 所示。由图 3 可知: 该风电场 1 min 级有功功率变化最大值约为 5.13 MW, 波动率为 10.2%, 超过标准中限值要求; 10 min 级有功功率变化量最大值约为 25.14 MW, 波动率为 50.3%, 超过标准中限值要求。



(a) 风电场全年每 10 min 有功功率变化量

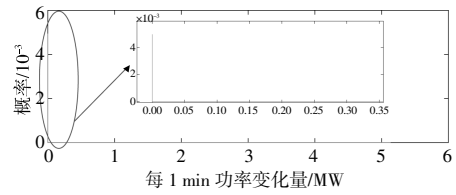


(b) 风电场全年每 1 min 有功功率变化量

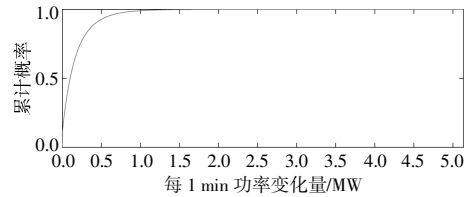
图 3 风电 10 min/1 min 功率变化量

Fig.3 1 min and 10 min power fluctuations of wind power

该风电场全年 1 min 和 10 min 最大有功功率变化量的概率分布和累计概率分布分别如图 4, 5 所示。由图 4 数据统计可得该风电场 1 min 有功出力波动大于 5 MW 的概率为 0.02%, 小于 5 MW 的概率为 99.98%。由图 5 可得该风电场 10 min 有功出力波动大于 16.7 MW 的概率为 0.13%, 小于 16.7 MW 的概率为 99.87%。



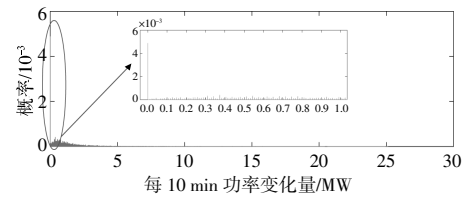
(a) 风电场全年每 1 min 功率变化量概率分布



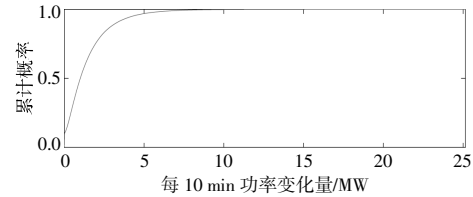
(b) 风电场全年每 1 min 功率变化量累计概率分布

图 4 风电 1 min 功率变化量的概率分布和累计概率分布

Fig.4 PDF and CDF of wind power fluctuations of 1 min



(a) 风电场全年每 10 min 功率变化量概率分布

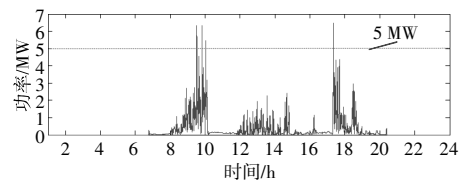


(b) 风电场全年每 10 min 功率变化量累计概率分布

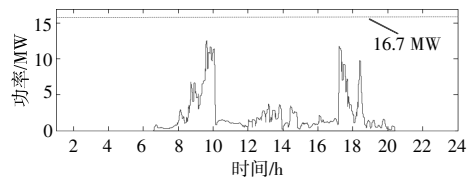
图 5 风电 10 min 功率变化量的概率分布和累计概率分布

Fig.5 PDF and CDF of wind power fluctuations of 10 min

根据式(1), (2), 分别计算该光伏电站 1 min 级和 10 min 级输出最大有功功率变化量, 见图 6。



(a) 1 min 最大有功功率变化量



(b) 10 min 最大有功功率变化量

图 6 光伏 1 min/10 min 最大有功功率变化量

Fig.6 Maximum active power change of PV of 1 min/10 min

从图 6 可以看出：该光伏电站 1 min 级有功功率变化量最大值为 6.5 MW，波动率为 13%，超过标准中限值要求；10 min 级有功功率变化量最大值约为 12.59 MW，波动率为 25.2%，未超过标准中限值要求。

对该光伏电站 1 min 级最大有功功率变化量进行概率统计，其 1 min 最大有功功率变化量的概率和累计概率百分比如图 7 所示。由图 7 数据统计可得该光伏电站 1 min 级有功出力波动大于 5 MW 的概率为 0.25%，小于 5 MW 的概率为 99.75%，即 1 min 级波动率超过 10% 的概率为 0.25%。

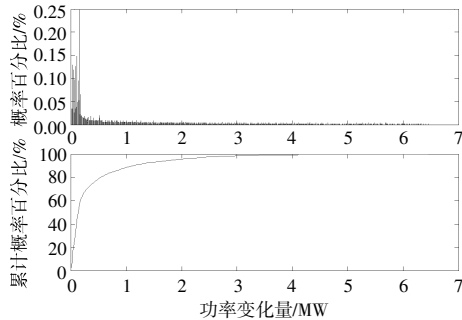


图 7 光伏 1 min 功率变化量的概率和累计概率百分比  
Fig.7 PDF and CDF of PV 1 min power percentage

由上述实际数据分析可知，风电场和光伏电站的 1 min 和 10 min 有功功率变化量均超过并网国标中规定的限值。因此，有必要配置储能平抑 1 min 和 10 min 有功功率波动，使其满足并网标准中限值要求。

## 2 储能配置方法

### 2.1 优化配置模型

利用储能平抑新能源输出功率波动的目标是使其并网  $T$  时间尺度最大有功功率变化(功率波动量)不超过限值  $\Delta P$ 。常规方法是计算通过滤波后的功率波动量是否满足要求，不满足要求再调整滤波截止频率，该方法不仅无法精准确定滤波频率，而且滤波对波动未超过限值的功率也会产生影响，过调导致储能配置量偏大。

为了将波动超过限值的功率和储能配置需求关联起来，并分析波动指标达到不同概率水平对储能配置量的影响，设满足条件的概率为  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )，若要使  $T$  时间尺度的最大功率波动量不超过  $\Delta P$  的概率大于等于  $\alpha$ ，则新能源  $T$  时间尺度最大功率波动量的累计概率分布函数  $F(\Delta P)$  应

满足：

$$F(\Delta P) = P_r(\Delta P_T \leq \Delta P) \geq \alpha \quad (5)$$

将式(1)和式(4)代入式(5)，可变换为

$$F(\Delta P) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^j \text{Num}\{[(\max P(\tau) - \min P(\tau)) \leq \Delta P]\} \geq \alpha \quad (6)$$

式(6)表示  $T$  时间尺度新能源输出功率波动量不超过限值的个数必须大于等于  $N\alpha$ 。同理，可推出  $T$  时间尺度功率波动量大于限值的个数应小于  $N(1-\alpha)$ 。

如果储能调节后功率波动量满足上述要求，且调节量最小，则需在功率大时充电、功率小时放电，式(6)满足等式：

$$\sum_{i=1}^j \text{Num}\{[\max P(\tau) - P_c] - [\min P(\tau) + P_d] \leq \Delta P\} = N\alpha \quad (7)$$

式中： $P_c, P_d$  分别为储能的充、放电功率。

### 2.2 模型求解流程

利用迭代计算求解式(7)的流程如下。

①根据式(6)计算新能源输出功率波动量的累计概率分布，若  $F(\Delta P) \geq \alpha$ ，则满足并网要求，不需要配置储能；若  $F(\Delta P) < \alpha$ ，则不满足要求，需要配置储能，继续下一步，对不满足条件的  $T$  时间尺度内的  $\max P(\tau)$  和  $\min P(\tau)$  进行调节。

②当  $\Delta P_T > \Delta P$  时，为不满足条件的值，对  $T$  时间尺度波动量对应的最大、最小功率值进行调节，将最大功率往下调(储能充电)，将最小功率往上调(储能放电)，使得调节后的  $T$  时间尺度功率波动量满足限值要求。有如下约束：

$$\Delta P_T = \max P(\tau) - \min P(\tau) = [\max P(\tau) - P_c] - [\min P(\tau) + P_d] \leq \Delta P \quad (8)$$

式中： $\max P(\tau), \min P(\tau)$  分别为调节后的目标功率最大、最小值。

③将式(1)代入式(8)变换可得：

$$P_c + P_d \geq \Delta P_T - \Delta P \quad (9)$$

④若要使储能所需的调节功率最小，且配置容量满足一个时间周期内充放电电量均衡，则式(9)应取“等号”且满足：

$$\sum P_c T = \sum P_d T \quad (10)$$

⑤可得储能最小的充电和放电调节功率为

$$P_c = P_d = (\Delta P_T - \Delta P) / 2 \quad (11)$$

⑥调整功率后,重新计算校验该时间尺度  $T$  内的功率变化量是否满足限值要求,若满足,则  $\sum_{i=1}^j Num$  个数增 1;若不满足,则继续调整,直至满足式(7)等式。

由上述求解过程可知,该方法只对不满足条件的功率值进行调节,不影响其他时段的功率。在不满足条件的时间段内,通过充电将最大功率往下调,放电将最小功率往上调,并且使充电和放电调节功率相等,既能使调节量最小,又能在一个调节周期内储能充电量和放电量均衡,保证下一个周期储能正常进行充放电。

储能充放电调节功率的计算流程见图 8。

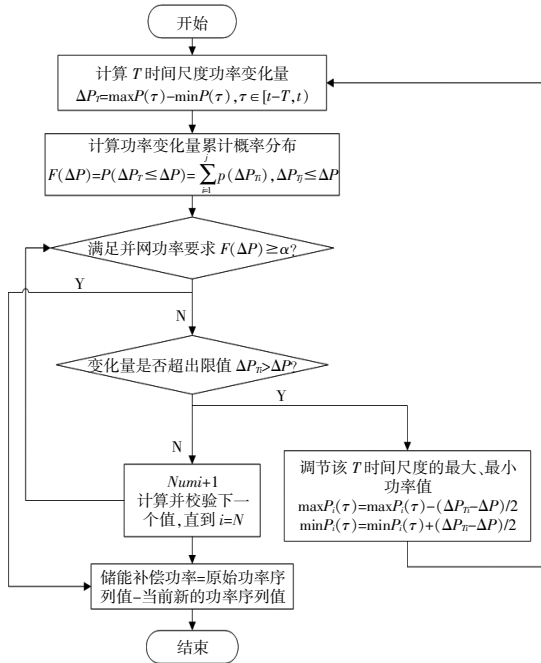


图 8 储能调节功率计算流程图

Fig.8 Calculation flow chart of energy storage compensation power

根据上述计算,即可得到储能调节的充放电参考功率值  $P_{ED}(t)$ ,该值为储能系统对外输出功率。

### 2.3 计算储能额定功率和容量

得到储能参考调节功率后,计算储能的额定功率容量和初始状态时还需要考虑如下因素。

#### ①储能充放电效率

以储能放电功率为正、充电功率为负,考虑充放电效率的储能充放电调节功率如下:

$$P_E(t) = \begin{cases} \frac{P_{ED}(t)}{\eta_d} & P_{ED}(t) \geq 0 \\ P_{ED}(t) \cdot \eta_c & P_{ED}(t) < 0 \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (12)$$

式中: $P_E(t)$ 为  $t$  时刻储能充放电调节功率; $\eta_d, \eta_c$  为储能放电、充电效率。

#### ②储能 SOC 约束

根据储能的充放电调节功率,储能实时荷电状态计算如下:

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\sum_{i=1}^N P_E(t) \frac{T_s}{3600}}{E_N} \quad (13)$$

式中: $E_N$  为储能额定容量; $SOC_0$  为初始荷电状态; $T_s$  为功率采样周期。

在运行中,储能系统的实时荷电状态应满足:

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (14)$$

式中: $SOC_{\min}$  和  $SOC_{\max}$  分别为储能荷电状态允许的最小值和最大值。

#### ③储能额定功率选取

在整个周期内,储能调节功率绝对值的最大值即为储能应具备的最大充放电功率,即储能的额定功率为

$$P_{EN} = \max\{|P_E(t)|\} \quad (15)$$

#### ④储能额定能量和初始 SOC 设置

根据储能充放电调节功率,在平抑功率波动的一个调节周期内(一般按天),每个时间段的储能充放电电量分别为

$$\begin{cases} E_c(t) = \sum_{i=1}^N P_{Ec}(t) \frac{T_s}{3600} \\ E_d(t) = \sum_{i=1}^N P_{Ed}(t) \frac{T_s}{3600} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $E_c(t), E_d(t)$  分别为储能充电能量和放电能量; $P_{Ec}(t), P_{Ed}(t)$  分别为储能充电和放电调节功率。

为了使储能在一个调节周期内 SOC 既不超过上下限,又能满足下一个周期调节需求,在每个调节周期内应使充电量和放电量相等,在 2.2 节的求解过程中已自动满足该条件。

根据式(13),(14),(16), $SOC_0$  应满足:

$$\begin{cases} SOC_0 \geq SOC_{\min} + E_d(t)/E_N \\ SOC_0 \leq SOC_{\max} - E_c(t)/E_N \end{cases} \quad (17)$$

根据式(11),(12),约束条件取满足条件的最小  $E_N$ ,可得:

$$\begin{cases} E_N = \frac{E_d(t)}{SOC_0 - SOC_{\min}} \\ E_N = \frac{E_c(t)}{SOC_{\max} - SOC_0} \end{cases} \quad (18)$$

通过式(18)两式相等可求得  $SOC_0$  为

$$SOC_0 = \frac{SOC_{max} + SOC_{min}}{2} \quad (19)$$

可求得储能额定容量为

$$E_N = \frac{2E_d(t)}{SOC_{max} - SOC_{min}} = \frac{2E_c(t)}{SOC_{max} - SOC_{min}} \quad (20)$$

⑤初始 SOC 对储能配置结果的影响

由式(19)和式(20)可知,  $SOC_0$  设置为最大最小荷电状态限值的平均值时, 能够满足该算法中的充放始末能量和 SOC 平衡。若  $SOC_0$  较小, 则储能没有足够的放电能量, 增大储能配置的额定能量, 会使充电时充不满, 储能利用率低; 若  $SOC_0$  较大, 则储能没有足够的充电空间, 增大储能配置的额定能量, 会使放电时放不完, 储能利用率低。

3 算例分析

以上述 50 MW 光伏 1 d 的出力数据为例, 假设储能充放电效率为 0.95,  $SOC_{max}$  取 0.9,  $SOC_{min}$  取 0.1。根据并网标准要求, 1 min 波动量小于 5 MW 的概率为 100%。利用所提方法优化计算储能调节功率及调节后的并网功率, 结果如图 9 所示。由图可以看出, 由于 1 min 波动量超过 5 MW 的值很少, 所以储能的调节功率很小, 只在极少数波动量超过 5 MW 的时段才有, 平抑后的并网功率没有相移。

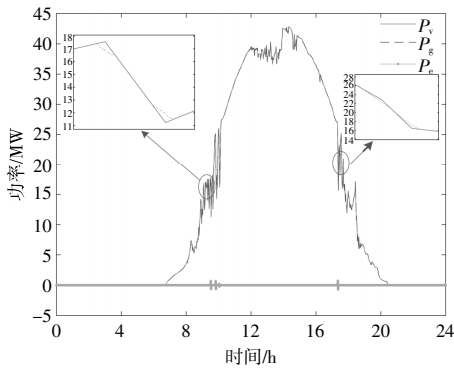


图 9 光伏出力  $P_v$ 、储能功率  $P_e$  和并网功率  $P_g$   
Fig.9 PV output, ES power and grid power

为验证不同时间尺度的波动指标对储能配置容量的影响, 对 1 min 和 10 min 最大有功功率变化量  $\Delta P$  分别取不同的限值, 求解出对应的储能调节功率及配置容量, 典型值如表 1 所示。

表 1 不同时间尺度的波动指标对应的储能配置  
Table 1 ES allocation corresponding to different time-scale and fluctuation indexes

波动量 限值 MW	对应 波动率 %	1 min 额定功率 MW	10 min 额定功率 MW	1 min 额定容量 MW·h	10 min 额定容量 MW·h
5	10	0.73	5.92	0.006	0.60
4	8	1.59	6.60	0.021	0.74
3	6	2.59	7.26	0.048	0.91
2	4	3.43	7.29	0.125	2.45
1	2	4.97	8.41	0.296	34.86
0.5	1	6.59	14.15	0.500	100.72

1 min 不同波动指标下储能调节功率曲线如图 10 所示。由图可以看出: 储能充放电功率基本平衡, 且和光伏功率中波动部分对应, 不会对原始功率造成偏移; 原始功率中波动满足条件的部分对应储能调节功率为 0, 所需的储能容量较小。

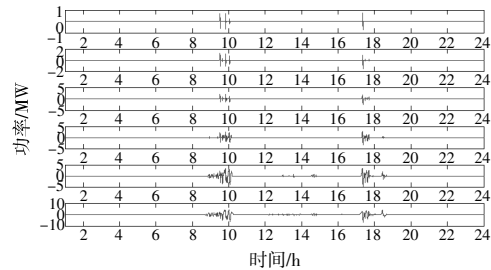


图 10 1 min 不同波动量限值对应的储能调节功率  
Fig.10 1 min power curves corresponding to different fluctuation indexes

不同波动率指标对应的储能容量曲线如图 11 和图 12 所示。由表 1 和图 11, 12 可以看出: 对同一个光伏输出功率, 1 min 短时间尺度的波动平

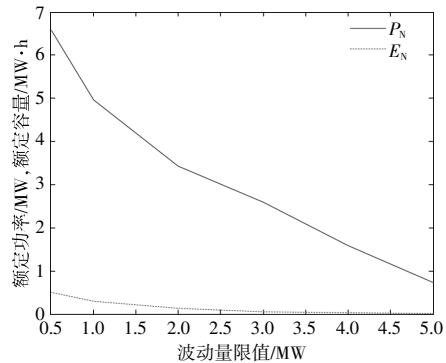


图 11 1 min 不同波动量限值对应的储能功率和容量  
Fig.11 1 min power and capacity corresponding to different fluctuation indexes

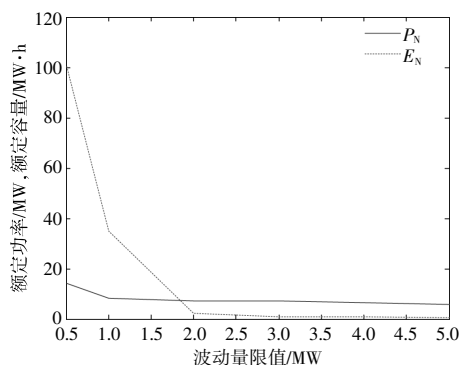


图 12 10 min 不同波动量限值对应的储能功率和容量  
Fig.12 10 min power and capacity corresponding to different fluctuation indexes

抑对储能功率需求较大,总的充放电能量较小,能量对功率的充放电时间为分钟级或秒级,需要选择能够频繁充放电切换的功率型储能系统;10 min 长时间尺度的波动平抑对储能容量需求较多,时间尺度的增加对储能容量需求的增长幅度大于对功率需求的增长幅度,随着波动量指标越来越小,储能容量增加出现跃变,充放电时间由数分钟变为数小时。因此对长时间尺度波动量要求较低时,要选择功率型和能量型相结合的混合储能系统。

表 1 中波动率小于 10%为国标中的基本要求,分钟级的配置能够满足要求;波动率小于 1%为非常高的要求,所以储能配置时长达到数小时。目前,对于实际工程中新能源大多按 10% 2 h 配置储能并无严格依据,业内认为主要考虑了新能源弃电 10%或新能源需要具备 10%的一次调频能力,实际运行中新能源场站基本不弃电,也没有对场站一次调频进行考核,所以导致新能源配储利用率较低。若新能源按 10%功率弃电,所需的储能 2 h 也是不够的。对于文中波动量小于 1%的极高要求,相当于使新能源功率曲线变为一个非常平滑的曲线,是需要长时储能的,但如果没有这种考核要求,则只需满足国标基本要求即可。

#### 4 结论

本文根据新能源输出功率在不同时间尺度的波动概率分布特征及并网指标要求,建立了包含时间尺度和波动量幅值的储能优化配置模型,根据模型求解出给定条件下的储能充放电调节功率,从而计算储能的额定功率、容量和初始状态。以某 50 MW 光伏电站实际出力为例,求解不同时

间尺度、不同波动指标限值及不同概率水平对储能配置的影响,对比了场站有无弃电对配置的影响,并和实际工程配置进行分析比较,由该方法和案例结果得到如下结论。

①依据现行标准,新能源输出有功功率分钟级变化量会出现超过标准要求的情况,因此需要利用储能对新能源功率分钟级波动量进行平抑。

②本文所提出的储能优化配置方法针对新能源场站端的具体功能需求,只对不满足波动指标的功率值进行调节,不会影响满足条件的功率值,具有针对性,所得的调节功率既能精确满足指标又不会过补。由于在算法中考虑了调节周期内的充放电量和 SOC 平衡,相比其他技术指标优化法所需储能容量最小,平抑后的并网功率也不会发生偏移。

③对相同的光伏输出功率,平抑短时间尺度的波动对储能功率需求较大,需选择能够频繁充放电的功率型储能系统;平抑长时间尺度的波动对储能容量需求较多,需选择能量型储能系统或长时储能系统;SOC<sub>0</sub>应设置为荷电状态允许上下限的均值,才能使得储能在一个调节周期内不会过充过放。

④平抑波动时间尺度的增加对储能容量需求的增长幅度大于对功率需求的增长幅度,在长时间尺度下随着波动量限值的降低,储能容量的增加会出现跃变。因此对长时间尺度波动量要求较高时,储能时长需求也增加,需要进一步结合新能源弃电情况,考虑应用长时储能。

#### 参考文献:

- [1] 孙天贺,靳双源,刘国斌,等.考虑源荷不确定性的光伏小镇鲁棒优化配置[J].电力工程技术,2023,42(6):42-51.
- [2] 孙碣,康赫然,韩永强,等.考虑新能源消纳的区域多能源系统网格化储能协调优化模型[J].可再生能源,2020,38(11):1551-1556.
- [3] 麻秀范,王戈,朱思嘉,等.计及风电消纳与发电集团利益的日前协调优化调度[J].电工技术学报,2021,36(3):579-587.
- [4] GB/T19963.1-2021.风电场接入电力系统技术规定第 1 部分:陆上风电[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [5] 余洋,权丽,贾雨龙,等.平抑新能源功率波动的聚合温控负荷改进模型预测控制 [J]. 电力自动化设备,

- 2021,41(3):92-99.
- [6] 汪海蛟,江全元.应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述 [J]. 电力系统自动化,2014,38(19):126-135.
- [7] 桑丙玉,王德顺,杨波,等.平滑新能源输出功率波动的储能优化配置方法[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3700-3706.
- [8] 雷鸣宇,杨子龙,王一波,等.光/储混合系统中的储能控制技术研究[J].电工技术学报,2016,31(23):86-92.
- [9] Lei Mingyu, Yang Zilong, Wang Yibo, et al. A MPC based ESS control method for PV power smoothing applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(3): 2136-2144.
- [10] Lin F J, Chiang H C, Chang J K, et al. Intelligent wind power smoothing control with BESS [J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(2): 398-407.
- [11] Nazaripouya H, Chu C C, Pota H R, et al. Battery energy storage system control for intermittency smoothing using an optimized two-stage filter [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 664-675.
- [12] 马伟,王玮,吴学智,等.平抑光伏并网功率波动的混合储能系统优化调度策略 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 58-69.
- [13] Xiaoyu Wang, Meng Yue, Eduard Muljadi, et al. Probabilistic approach for power capacity specification of wind energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1215-1223.
- [14] 徐衍会,徐宜佳.平抑风电波动的混合储能容量配置及控制策略[J].中国电力,2022,55(6):186-193.
- [15] 修晓青,唐巍,李建林,等.基于层次分析法的储能配置综合评估技术[J].电力系统自动化,2018,42(11):72-78.
- [16] 朱娟娟,段奕琳,闫群民,等.基于BAS-IMOPSO算法的风电系统储能优化配置[J].电力工程技术,2023,42(2):180-187.
- [17] 付爱慧,张峰,张利,等.考虑爬坡功率有限平抑的高渗透率光伏电网储能配置策略[J].电力系统自动化,2018,42(15):53-61.

## An energy storage configuration optimization method considering power probability distribution characteristics of renewable energy

Sang Bingyu<sup>1</sup>, Yang Bo<sup>1</sup>, Tao Yibin<sup>1</sup>, Liu Ketian<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Energy Storage Variable Current and Application Engineering Technology Research Center (China Electric Power Research Institute), Nanjing 210003, China; 2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** In order to reduce the influences of renewable energy power fluctuations on power systems, an energy storage configuration optimization method considering renewable energy power probability distribution is proposed in this paper. Firstly, calculate and count the renewable energy power fluctuations at different time scales, and determine the probability distribution characteristics of renewable energy power. Secondly, according to the probability distribution characteristics and the grid-connected index of renewable energy, the configuration optimization model of energy storage considering the renewable energy time-scale and power fluctuation is set up. Thirdly, based on the given constraints and time scale, calculate the minimum energy storage charging and discharging power where the fluctuations meet any set probability levels, thereby determining the rated power, capacity and initial state of the energy storage. At last, through calculation and analysis using the data measured from a 50 MW photovoltaic power station, the method is proved to be correct and effective. This method only compensates the fluctuated power that does not meet the fluctuation index, and has no impact on the power that has already satisfied.

**Keywords:** renewable energy; power fluctuations; probability distribution; energy storage; configuration optimization